

УДК 543.423

СЕМЕЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ АТОМНО-ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ «ШАРОВАЯ МОЛНИЯ»

Е.М.Мандрик
ООО «ВМК-Оптоэлектроника»
630090, Новосибирск, а/я 376
info@vmk.ru

Проведено сравнение схемотехнических решений универсального генератора «Шаровая молния» с различными электрическими источниками возбуждения спектров для атомно-эмиссионного анализа отечественного производства. Генераторы «Шаровая Молния» обладают высокой стабильностью характеристик в разных режимах работы и создают широкие возможности выбора условий дугового и искрового возбуждения спектров при решении большого круга аналитических задач.

Мандрик Егор Михайлович – руководитель отдела спектроаналитических генераторов ООО «ВМК-Оптоэлектроника».

Область научных интересов: электротехника, радиофизика, атомно-эмиссионный спектральный анализ.

Автор более 10 научных публикаций.

В настоящее время для решения многих задач атомно-эмиссионного спектрального анализа широко используют такие электрические источники возбуждения спектров (ИВС), как дуговые и искровые разряды.

Развитие этих видов электрического разряда состоит из двух основных стадий [1, 2]. На первой стадии, которая длится менее 10^{-7} с, происходит пробой межэлектродного пространства высоким напряжением. В это время начинает формироваться канал разряда и происходит резкое падение напряжения на электродах. Оптический спектр плазмы на этой стадии содержит только спектральные линии компонентов атмосферных газов, так как за это время анализируемое вещество не успевает поступить в аналитический промежуток. Следующая стадия, когда за счет энергии, переданной каналом разряда электродам, вещество пробы начинает поступать в межэлектродный промежуток, имеет существенные различия для «дуговых» и «искровых» источников. В дуговых разрядах, на электродах которых относительно длительное время поддерживается питающее напряжение, формируется проводящий столб значительного сечения, так что плотность тока составляет около 10 А/мм^2 при падении напряжения 15 - 200 В. Это обуславливает температуру плазмы, которая в первом приближении пропорциональна плотности тока J [3], не выше 8000 К, причем плазменное облако, в основном, состоит из продуктов испарения или эрозии электродов. В искровых разрядах за счёт их короткой длительности ($\tau < 10^{-4}$ с), сечение канала, определяемое тепловой скоростью молекул, не превышает 0.1-0.3 мм², что обеспечивает плотность тока порядка 10^3 А/мм^2 с амплитудным падением на-

пряжения на аналитическом промежутке менее 100 В. В силу этого искровые разряды в канале имеют температуру выше 40000 К. За счет энергии канала происходит нагрев факелов - продуктов эрозии электродов, так что температура в этих образованиях искры, несущих информацию о составе материала электродов, составляет 10000-15000 К. Скорость поступления вещества пробы в межэлектродный промежуток определяется реализованным механизмом (испарение или эрозия) и зависит от полярности рабочего электрода, силы тока, длительности воздействия разряда и других факторов [2]. Следовательно, задавая длительность и силу тока разряда, можно контролировать основные спектроаналитические (температурные) характеристики плазмы.

Основной принцип ограничения силы тока разряда в традиционных ИВС состоит в использовании балластного сопротивления либо LCR контура. В электрической схеме таких генераторов регулировка силы тока и длительности разряда осуществляется ручным переключением активных и реактивных элементов.

«Классические» схемы, реализованные в генераторах типа УГЭ-4, ИВС-29 и т.п., приведены на рис. 1 и 3.

В дуговых генераторах (рис. 1) типичная потребляемая мощность при силе тока в дуге 10 А составляет около 3 кВт, при этом непосредственно разрядом расходуется только 300 - 600 Вт. Следовательно, КПД таких генераторов составляет 10-20 %. Значительная энергия преобразуется в тепло балластным резистором, изменяя температурный режим в лабораторном помещении.

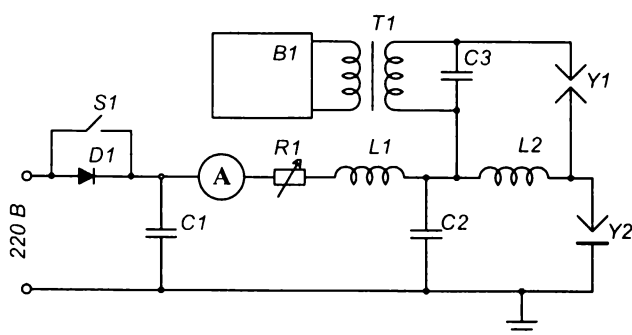


Рис.1. Принципиальная схема генераторов «Дуга постоянно/переменного непрерывного/пульсирующего тока», «Низковольтная искра»

S1 – переключатель постоянный/переменный ток, D1 – выпрямитель, работающий при постоянной полярности тока разряда, A – амперметр, R1 – балластный резистор, ограничивающий ток дуги либо ток зарядки конденсатора C2, C1L1 – низкочастотный фильтр, C2 – накопительный конденсатор, B1 – генератор импульсов поджига, C3 – высоковольтный конденсатор для поджига, Y1 – воздушный разрядник для поджига, T1 – повышающий высоковольтный трансформатор, C3 – высоковольтный конденсатор 12 - 18 кВ, L2 – высоковольтный дроссель, Y2 – аналитический промежуток

Форма выходного тока в «классических» дуговых схемах переменного тока не является синусоидальной, а представляет собой импульсы сложной формы, зависящей от параметров питающей сети. Заполнение времени экспозиции током зависит от фазы поджига разряда и составляет не более 50% (рис.2). Вследствие прерывистости горения дуги вещество электродов и пробы поступает в плазму менее интенсивно, чем при 100 %-ном заполнении током времени экспозиции [1].

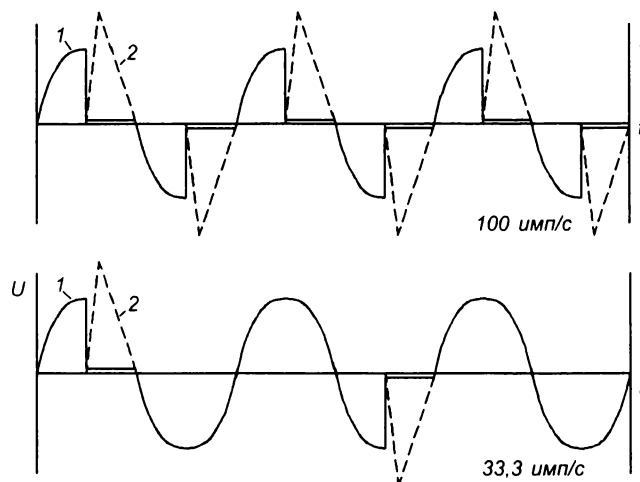


Рис.2. Типичные диаграммы напряжения (1) и силы тока (2) в режиме «Дуга Переменного Точа»

В «классических» искровых схемах ([1, 2], рис.3) присутствуют резисторы, ограничивающие ток зарядки конденсаторов. При протекании через резистор заряда $Q=C_1U_1$ выделяется тепловая энергия [5]

$$E_{\text{ддд}} = \frac{U_1^2}{R_1} \int (e^{-t/R_1C_1})^2 dt = \frac{C_1U_1^2}{2}$$

равная энергии заряда конденсатора C1. Поэтому КПД «классических» искровых генераторов не может быть более 50%.

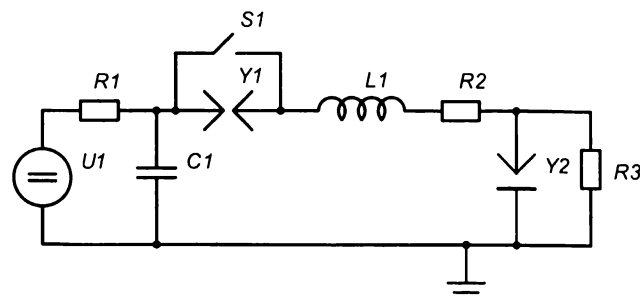


Рис.3. Принципиальная схема генераторов «Высоковольтная искра»

U1 – регулируемый источник напряжения 8 - 15 кВ, R1 – резистор, ограничивающий ток зарядки конденсатора C1, S1 – ключ, включающий вспомогательный разрядник Y1, C1, L1, R2 – образуют колебательный контур, ограничивающий ток разряда, Y2 – аналитический промежуток, R3 – шунтовое сопротивление

При использовании вспомогательного разрядника, существенно улучшающего стабильность импульсов тока высоковольтного искрового разряда [1 - 3], когда в контур последовательно включены вспомогательный и аналитический межэлектродные промежутки, суммарные потери энергии составляют уже более 75%.

Форма тока искрового разряда (рис.4) определяется параметрами LCR контура и может иметь колебательный ($\frac{RC}{L/R} < 4$) или апериодический ($\frac{RC}{L/R} > 4$) характер. Ток колебательного разряда является затухающей синусоидой с полупериодом $\tau \approx \pi\sqrt{LC}$, максимальная сила тока определяется как $I_{\max} = \frac{U}{\sqrt{L/C} + R}$.

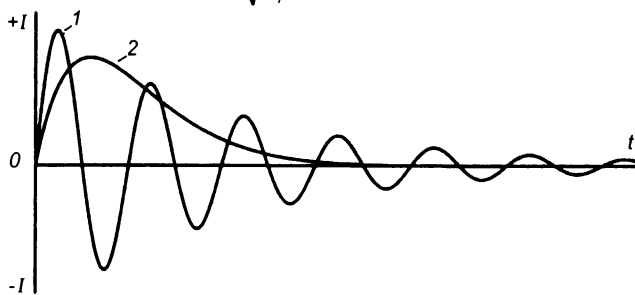


Рис.4. Типичный вид искрового разрядного тока
1-колебательный режим разряда, 2-апериодический режим разряда

Преимуществом «классических» генераторов является методически обоснованное применение их в тех или иных режимах работы для решения аналитических задач в атомно-эмиссионных комплексах.

Их типичные недостатки приведены ниже:

1. Для смены режимов работы генератора требуется выключать генератор, чтобы перекоммутировать R, L, C –элементы.

2. При эксплуатации генераторов, построенных по классической дуговой схеме, из-за низкого КПД возникают трудности при работе с токами свыше 10 А. Кроме того, такие ИВС имеют большие массогабаритные показатели и из-за использования воздушных разрядников, энергоёмких индуктивностей и конденсаторов, мощных вентиляторов охлаждения реостатов создают высокий уровень шума при работе.

3. Часто случающиеся в условиях крупного производства изменения напряжения питающей сети приводят к нестабильности рабочей силы тока.

4. Стабильность тока разряда определяется параметрами воздушных разрядников, которые зависят от состояния окружающей атмосферы, а также имеют ограниченный ресурс работы, требуют периодического обслуживания и ремонта. Для улучшения параметров разряда в генерато-

ре УГЭ-4 используется управляемый водородный тиратрон, который имеет ограниченный срок службы.

5. С помощью LCR контура невозможно сформировать импульс тока правильной трапецидальной формы желаемой полярности и обеспечить необходимое чередование этих импульсов. При этом форма тока разряда определяет такое качество плазмы, как соотношение «искровых» и «дуговых» линий в спектре, а полярность тока разряда влияет на процесс поступления анализируемого вещества с электродов в аналитический промежуток. Таким образом, при работе с «классическими» схемами пользователь лишён возможности оперативно и в широких пределах управлять физическими процессами, протекающими в разряде.

При создании универсальных генераторов «Шаровая Молния» (ШМ) мы стремились устранить вышеперечисленные недостатки. Современные технологические и схемотехнические решения, применённые в нём, позволили вне зависимости от изменений напряжения питающей сети и состояния атмосферы формировать в разряде импульсы тока заданной амплитуды, полярности, длительности и частоты с достаточно крутыми фронтами (см. табл).

Возможность создания генераторов «Шаровая молния» определилась следующими факторами:

1. В последние годы на рынке появились современные мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) с временем коммутации менее 1 мкс, силой тока до 300 А, напряжением до 3300 В, что позволило использовать импульсную полупроводниковую схемотехнику [4] для построения систем поджига и формирования тока разряда.

2. Низкие потери в коммутирующих IGBT элементах позволили увеличить частоту преобразования энергии сети в ток разряда до 25 - 100 кГц. Увеличение частоты преобразования создало условия для качественной стабилизации формы тока разряда заданной полярности в широком диапазоне независимо от частоты, напряжения питающей сети и сопротивления нагрузки. Одновременно это привело к снижению массогабаритных показателей генератора и уровня шума.

3. Высокое быстродействие полупроводниковых IGBT ключей, оригинальная конструкция высоковольтных импульсных трансформаторов позволили отказаться от воздушных разрядников, громоздких реактивных элементов (индуктивностей и высоковольтных конденсаторов), тиратронов и балластных резисторов.

Таблица

Характеристики генераторов «Шаровая Молния»

Технические параметры	ШМ25	ШМ40	ШМ250	ШМ«просыпка»	Плазмотрон
Диапазон регулировки силы выходного тока, А	$\pm 0,7 - 25$	$\pm 0,7 - 40$	$\pm 0,5 - 250$	$\pm 2 - 40$	5 - 200
Дискретность задания силы тока разряда, А	0,1	0,1	0,1	0,1	1
Погрешность стабилизации силы тока, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Максимальное количество режимов за время экспозиции	8	8	8	8	8
Длительность каждого режима, с	0,1 - 250	0,1 - 250	0,001 - 1000	0,1 - 250	0,1 - 250
Максимальная средняя выходная мощность, кВт	1,5	2	2	2,5	30
Напряжение питания, В	Однофазная сеть 200 - 250				Трёхфазная сеть 300-400
Максимальная энергия импульса искры, Дж	0,5	0,5	10	-	-
Форма импульса выходного тока	Трапецеидальная				Постоянный ток
Скорость нарастания тока в разряде, А/мкс	0,05	0,05	50	0,05	-
Скорость спада тока в разряде, А/мкс	0,15	0,15	50	0,15	-
Частота выходного переменного тока, Гц	0,5, 1, 2,5, 5, 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 500				-
Частота выходного однополярного, прерывистого тока, Гц	1, 2, 5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1000			-	-
Габариты генератора, мм	440x420x180	480x450x170	440x420x180	510x320x380	800x600x400
Вес генератора, кг	17	20	21	32	60
Охлаждение генератора	Воздушное				Воздушно-водяное

Схема генераторов ШМ25.40 приведена на рис.5. В непрерывном дуговом режиме нам удалось стабилизировать ток разряда до 40 А, уве-

личить КПД до 85%, снизить электромагнитные помехи, уменьшить энергопотребление, габариты и массу генератора.

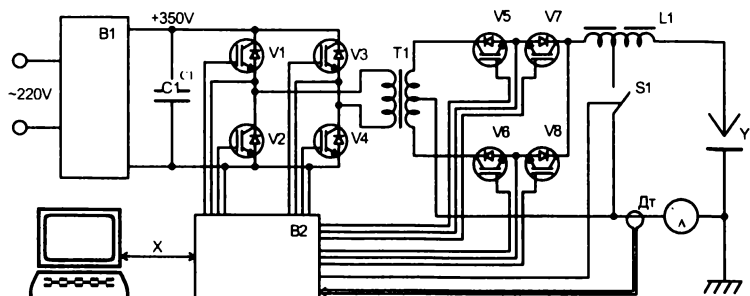


Рис.5. Принципиальная схема генераторов «ШМ25, ШМ40, просыпка»

B1 – блок сетевых выпрямителей, фильтров, коррекции коэффициента мощности, C1 – электролитический накопительный конденсатор, V1,2,3,4 – транзисторы, составляющие широтно-импульсный преобразователь, работающий на частоте 25 кГц, T1 – разделительный трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку с питающей сетью, V5,7, V6,8 – транзисторы, одновременно составляющие управляемый выпрямитель и конвертор, уменьшающий время спада выходного тока, L1 – интегрированный высоковольтный трансформатор поджига и индуктивность, сглаживающая высокочастотные пульсации выходного тока, S1 – высоковольтный ключ поджига, ДТ – широкополосный бесконтактный датчик постоянного тока, Y1 – аналитический промежуток, B2 – плата управления и интерфейса с компьютером, X – оптоволоконный канал связи

Схема генератора «Шаровая молния» предусматривает использование устройства активной коррекции коэффициента мощности сети - Power Factor Correction (PFC), снижающего тепловую нагрузку на питающую сеть, что делает прибор отвечающим современным международным стандартам по электромагнитной совместимос-

ти [6]. Оптоволоконная связь с управляющим компьютером обеспечивает высокую безопасность персонала при работе с генератором (гальваническая развязка по цепям управления свыше 100 кВ).

Возможность заполнения времени экспозиции током в генераторах «Шаровая молния» близка к 100 % (рис.6).

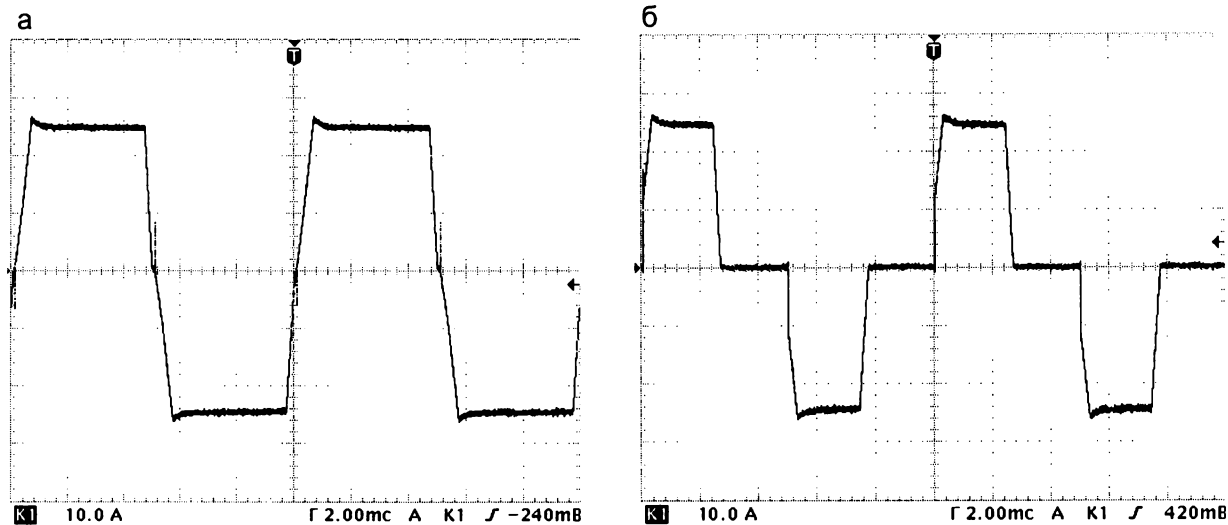


Рис.6. Типичные осциллограммы силы тока генератора ШМ25 в режимах дуга непрерывного (а) и прерывистого (б) переменного тока

Искровой разряд характеризуется импульсами с плотностью тока более 100 А/мм² [3]. Универсальный генератор ШМ250 (рис.7) предоставляет возможность создавать импульсы трапецидальной формы амплитудой до 250 А, длительностью от 1 мкс контролируемой полярности и частоты с возможностью оперативно управлять их значениями во время экспозиции.

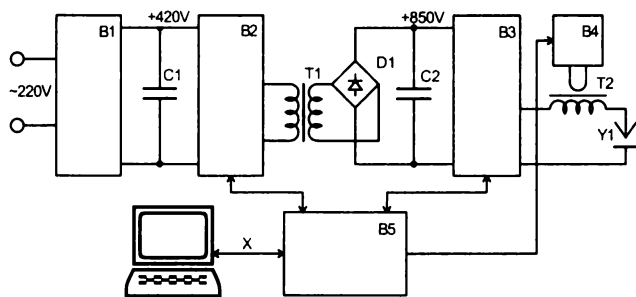


Рис.7. Принципиальная схема генераторов «ШМ250»
B1 – блок сетевых выпрямителей, фильтров, коррекции коэффициента мощности, C1 – электролитический конденсатор сетевого фильтра, B2 – импульсное зарядное устройство, T1 – разделительный трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку выхода генератора с питающей сетью, D1 – 25 кГц выпрямитель, C2 – импульсный накопительный конденсатор, B3 – импульсная схема формирования выходного тока разряда с рабочей частотой 25 - 100 кГц, B4 – генератор импульсов поджига, T2 – высоковольтный трансформатор поджига 20 кВ, Y1 – аналоговый промежуток, B5 – плата управления и интерфейса с компьютером, X – оптоволоконный канал связи

Генератор ШМ250 позволяет достичь в импульсном режиме максимальной энергии импульса

10 Дж с плотностью тока более 300 А/мм², а в непрерывном режиме дугового разряда максимальной мощности 2 кВт.

Несомненным преимуществом генератора ШМ250 перед «классическими» является возможность установки полярности, плотности тока и длительности импульсного разряда, а также формирования импульсов заданной формы.

Компьютерное управление генератором «Шаровая молния» (рис.8) позволяет оперативно менять любой параметр тока разряда и комбинировать режимы работы генератора во время экспозиции для получения оптимальных условий возбуждения спектров разнообразных проб – порошков, благородных металлов, сплавов на медной и алюминиевой основах и т.д., тем самым увеличивая производительность анализа.

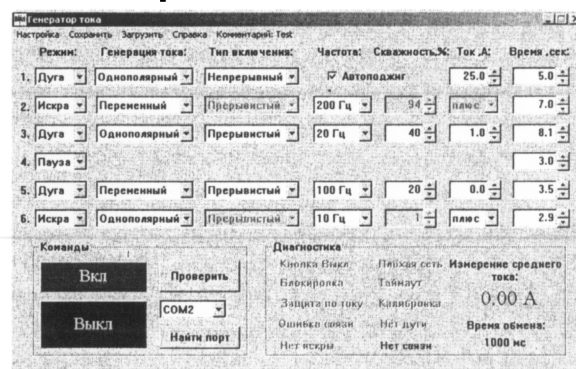


Рис.8. Основное меню программы управления генератором «Шаровая Молния»

Таким образом, применение оригинальных схемотехнических разработок, а также использование последних мировых технологических достижений в области твердотельных полупроводниковых компонентов позволили нам создать серию малогабаритных генераторов «Шаровая Молния», положительно зарекомендовавших себя

в работе. Мы надеемся, что новые режимы генерации тока разряда генераторов «Шаровая молния» создадут условия для разработки перспективных методик анализа, снижающих пределы обнаружения примесей, расширяющих возможности метода атомно-эмиссионного спектрального анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дробышев А.И. Основы атомного спектрального анализа. С-Пб.: Изд-во С.-Пб. ун-та, 2000. 200 с.
2. Буравлёв Ю.М. Основы атомно-эмиссионного спектрального анализа металлов и сплавов. Донецк: Изд-во ДонУ, 2001. 438 с.
3. Зайдель А.Н. Техника и практика спектроскопии / А.Н. Зайдель, Г.В. Островская, Ю.И. Островский. М: Наука, 1972. 376 с.
4. Севернс Р.П. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Р. П. Севернс, Г. Блум. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М.: Высш. шк., 1978. 528 с.
6. Панфилов Д.И. Типовые схемы корректоров коэффициента мощности / Д.И.Панфилов, В.С.Иванов // Chip News (Новости о микросхемах). 1997. № 9-10. С.38-45.

* * * * *

ATOMIC-EMISSION SPECTRA ELECTRICAL SOURCE OF "FIREBALL" FAMILY

E.M.Mandrik

Circuit technique technology solutions comparison of multi-purpose generator "Fireball" and different types of domestically produced electrical sources for a spectrum excitation and the atomic-emission analysis is carried out. Different arc and spark working conditions create great possibilities of changing conditions for spectrum excitation and, consequently, spectral lines intensities, continuous and molecular spectrum and also time stability of spectrum emission.
